

Obras subterráneas

ANGEL GARCIA YAGÜE, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

I. Definición

En una ordenación lógica de las estructuras de hormigón para su análisis en estas jornadas, era preciso recurrir a unos criterios, que podían ser de tipo estructural, ambiental o funcional. Todos eran defendibles con argumentos teóricos o prácticos y en todos ellos destacaba un factor común: el terreno.

En sus anchas espaldas se encajó el concepto de “obras subterráneas”. Pero en toda obra existe una parte subterránea, no visible ni accesible: la cimentación. Su importancia es grande, pues si falla, su caída arrastra la estructura que soporta.

En una solución de compromiso consideramos como obra subterránea toda estructura o parte de ella, que de forma permanente está en contacto con el terreno, en un ambiente propio cuyas características predominantes se deben a la roca o suelo y sus componentes. Por ello habremos de incluir en este apartado los túneles, galerías, grandes cavidades artificiales, conducciones de hormigón enterradas y las cimentaciones, bien a través de macizos, placas o losas, bien por pilotes.

II. Comunicaciones

Sobre el tema no se han presentado comunicaciones, quizá porque son pocas las experiencias, porque su propia y normal dificultad de acceso impide un estudio y presentación adecuada, o porque su explicación no estaba clara o no era publicable.

III. Ataque al hormigón

Los fenómenos que pueden atentar a la durabilidad del hormigón en contacto con el terreno pueden ser clasificados en químicos, físicos y mecánicos. En los ataques químicos se incluye la agresividad por desalcalinización, por acidez, por anhídrido carbónico libre, por contenido de sulfatos y por contenido de magnesia.

En los físicos los efectos de las corrientes parásitas y los fenómenos térmicos.

En los mecánicos los asentos y hundimientos o las sobrecargas repetidas provenientes del terreno, que pueden motivar la destrucción del cimiento o fisuras que aceleran los procesos anteriores.

IV.1. Ataque químico

Se produce a través del agua y por aniones, como el CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y CO_3H^- , o por cationes como el Mg^{++} . Los procesos de ataque al hormigón son complejos y más propios de otros temas de estas jornadas.

Si no existe agua, no habrá ataque, primera condición para que exista en las obras subterráneas. Por ejemplo, una cimentación sobre yeso sin agua no sufrirá ataque químico por muchas que sean las deficiencias de la construcción.

El agua tiene una capacidad limitada de disolución de sales, que por disociación originan los cationes y aniones y que deben combinarse con los compuestos del hormigón en el proceso del ataque; por ejemplo, para el caso del yeso, 2,5 g por litro para 20° de temperatura. Luego para descomponer un cierto volumen de hormigón se precisa otro de agua, que debe circular hacia el hormigón, o sea, en nuestro caso se precisa una circulación de agua, a la que se opone la impermeabilidad del terreno y que implica la existencia de unos gradientes piezométricos. Si el agua está estancada no habrá ataque o será tan lento en la generalidad de los casos que puede despreciarse. Si el terreno es muy impermeable sucederá lo mismo. Pero el ataque al hormigón es de fuera hacia adentro, salvo que el enemigo se encuentre previamente en el interior, cosa frecuente que explica muchos casos en principio inexplicables. Al atacar exteriormente, si no existe un lavado o arrastre de los productos originados por el ataque químico, éstos forman una costra o barrera más o menos incompleta y retrasan el proceso. La barrera desaparecerá a efectos prácticos si en el hormigón existen huecos intercomunicados o fisuras con diámetro superior a un valor que desconocemos. De lo anterior surge otro principio de defensa: la compacidad e impermeabilidad del hormigón.

Si, por el contrario, el mal está en el interior de la masa de hormigón, las mínimas cantidades de agua precisas para que se realicen las combinaciones o las tiene el hormigón durante su proceso de fraguado o penetran por capilaridad en tiempo relativamente corto.

El ataque químico se produce por el agua, pero, en el caso de las obras subterráneas, las aguas toman las sales del terreno por el que transcurren o se encuentran. Por ello suele analizarse el contenido de yeso en el suelo y calificar la agresividad por su porcentaje de SO_4 , Cl , Mg , etc. pero la agresividad es del agua, cuyo contenido en sales puede ser muy diferente del que se encuentre en el suelo.

Si nos referimos a ésta, el ataque puede estar determinado por un deficiente contenido del anión CO_3H^- , agresividad de desalcalinización, que disuelve los componentes alcalinos del hormigón. Este fenómeno es frecuente en las galerías de las presas, donde las pequeñas fugas roban Ca y al surgir en el ambiente húmedo y templado de las galerías lo depositan en forma de estalactitas y estalacmitas. Sin embargo, en el caso de las obras subterráneas las aguas toman rápidamente el Ca que les falta del propio terreno, al menos en toda la "España calcárea".

Ataque análogo es el motivado por la agresividad general ácida, cuando el contenido de hidrogeniones es excesivo. Como índice se utiliza el pH, siendo agresiva el agua cuando su valor es inferior a 6.

Estos dos tipos de ataque están en contradicción con el ataque de los sulfatos, ya que las aguas ácidas subterráneas implican terrenos no margosos, que normalmente cohabitan con los yesos. Son propios de las zonas graníticas, de la “España silíceas”. En estos terrenos la impermeabilidad suele ser elevada, la circulación del agua en ellos es más a través de fisuras y litoclasas que por su masa y el ataque se produce principalmente en las obras que retienen o conducen estas aguas y no en las subterráneas.

El contenido del anhídrido carbónico libre CO_2 motiva la agresividad carbónica, en un ataque análogo a los anteriores. Se produce en parajes especiales por la existencia de aguas termales o zonas pantanosas, con formación de compuestos de carbono.

La agresividad de los sulfatos es quizá la más conocida en nuestro país, debido a la gran abundancia de yeso, hasta el extremo que en unos 290.000 km² puede existir yeso en superficie o próximo a ella y cabe considerar este área como la “España yesosa”, que ocupa aproximadamente las mismas regiones que la España calcárea. Se ha calculado la superficie ocupada por los yesos o terrenos yesosos, concluyéndose que éstos se presentan en unos 38.500 km² y afectan a 37 provincias españolas. Los yesos se encuentran en forma primaria en el Keuper (4.600 km²), en el Eoceno y Oligoceno (14.500 km²), en el Mioceno (16.000 km²) y en el Cuaternario (500 km²), pero también se encuentran en facies singulares del Wealdense y Plioceno. De forma secundaria, a partir de los primeros por disolución, transporte y cristalización en huecos y fracturas, en todos los pisos geológicos restantes, siempre que se encuentren cerca de los yacimientos primarios, o sea en la “España yesosa”.

Es lógica, pues, la prevención y miedo al yeso y excusables los excesos de precauciones que se han tomado en múltiples ocasiones.

Pero, como ya se ha indicado anteriormente, el ataque de las aguas sulfatadas exige la presencia del agua, su movimiento (gradiente piezométrico y permeabilidad en el terreno) y posibilidad de que penetre en el hormigón si sus efectos han de ser destructivos y no limitarse a una pequeña zona superficial.

El ataque de las aguas yesosas es muy variable en función de las restantes sales disueltas; por ello no debe tomarse como indicativo de su potencial ataque solamente el contenido de $\text{SO}_4^{=}$ en el suelo o en el agua y debe acompañarse al menos con los contenidos de Mg^{++} (agresividad magnesiana) y del anión Cl^- . Es más, creemos que existen otros elementos aún no localizados que actúan como catalizadores y cambian con su presencia sustancialmente la intensidad del ataque.

El yeso no se presenta en la naturaleza como mineral puro. J. M. López Azcona analizó cuantitativamente cien muestras de yeso procedentes de todas las regiones de España y en ellas encontró los siguientes valores máximos de los siguientes elementos químicos:

	%		%		%		%
Al	4,0	Fe	0,7	Mn	0,1	Si	7,0
Ba	2,0	K	0,5	Na	0,9	Sn	0,1
Cr	0,02	Li	0,4	Ni	0,05	Sr	4,3
Cu	0,005	Mg	4,00	Pb	0,01	Ti	0,1
						Zr	1,0

En todas las muestras estaban presentes los siguientes elementos: Al, Ba, Cu, Fe, Mg, Si, Sr y Ti. Destacan los valores relativamente elevados de Si, Sr, Mg, Al y Ba.

Cuando el agua se carga de yeso lo hace igualmente de los elementos que le acompañan, tanto más cuanto más solubles sean sus sales. Por ello, la agresividad será muy diferente de unas zonas a otras, en especial por la presencia del Mg, cuyo importante papel ha sido reconocido y da lugar a la llamada agresividad magnesiana, hasta el punto que, en algunas normas, se considera que para que exista agresividad por los sulfatos es preciso que el contenido del catión Mg supere una cierta proporción. La variación del contenido de sulfatos en las muestras analizadas, a las que antes nos referíamos, oscila entre 0,004 % al 4,0 %, lo que indica la variedad potencial agresiva de los sulfatos y de las aguas en los terrenos yesosos.

Las aguas contaminadas con productos industriales, tales como sales de amonio, aceites o grasas vegetales, etc., no son frecuentes en el terreno y aunque precisan igualmente medidas especiales, no las consideramos.

IV.2. Ataque físico

En él incluimos los efectos térmicos y las corrientes naturales o parásitas que existen en el terreno.

Los efectos térmicos son normalmente de origen humano y sus efectos motivarán fisuraciones, que facilitan el ataque de los otros agentes agresivos.

Las corrientes eléctricas de origen natural son de dos tipos. En el primero incluimos las telúricas, de muy débil intensidad, por lo que no las consideramos, y las surgidas por los potenciales propios o espontáneos del terreno. Estos se originan por procesos de oxidación de minerales metálicos, por la presencia del agua en los contactos entre materiales diferentes y por procesos de electrofiltración del agua subterránea. En el caso de materiales conductores se han medido diferencias de potencial de 1,5 voltios y gradientes de 1 a 6 mV por metro. Los procesos de descomposición del hormigón por electrolisis se han localizado y estudiado ampliamente en las tuberías de conducción de agua semienterradas o enterradas, que es preciso proteger catódicamente.

En los terrenos con resistividad del orden o inferior a los 10 ohmios metro, el fenómeno puede ser muy importante y ha causado serias averías y destrucciones.

También habremos de considerar el fenómeno de derivación de corriente a través del hormigón, de forma continua y no controlada. Sin embargo, este fenómeno es menos importante, pues por una parte la corriente debe ser continua y por otra la derivación utiliza normalmente las armaduras como camino lógico y fácil para alcanzar el terreno, o, lo que es más frecuente, las tuberías de conducción metálicas, que acusarán los efectos previamente.

IV.3. Ataque mecánico

En él incluimos las vibraciones naturales o artificiales del terreno.

A las primeras corresponden las acciones sísmicas, pero éstas motivan tensiones muy bajas en el terreno, y por tanto en la cimentación: difícilmente superarán los 2 kg/cm². De forma análoga las vibraciones artificiales del terreno están lejos de los valores que podrían ocasionar fisuraciones en el hormigón de las obras subterráneas.

Hemos excluido las deformaciones permanentes del terreno, como las que se originan por el desplazamiento de una falla durante un sismo, ya que son fenómenos muy localizados y cuya naturaleza impide una lucha directa para evitar sus efectos.

Otro tipo de fenómenos ligados a las vibraciones es la compactación brusca del terreno o pérdida de su capacidad portante por un fenómeno de licuefacción que no tratamos, ya que nos alejaríamos de las condiciones normales en nuestro territorio y objetivos del tema. Sin embargo y por su asociación frecuente con los terrenos yesosos, sí debemos decir algo de los fenómenos de hundimiento del terreno o compactación brusca por la presencia del agua en estos materiales.

Es conocido que en los terrenos calcáreos se forman sumideros, dolinas y torcas. Estas son grandes depresiones de forma circular y paredes escarpadas, cuyo origen se ha explicado por la formación de una cavidad subterránea, que progresa hacia superficie, hasta que, al ser insuficiente la bóveda exterior para resistir su propio peso, se desploma. La dureza de estas rocas y su resistencia, ha permitido controlar este proceso por el estudio de las diferentes fases en el que se encuentra. De forma análoga este fenómeno se produce en las rocas salinas, sólo que en este caso su velocidad es mayor y no es tan fácil estudiar sus etapas, pero por el contrario sí se ha podido controlar su desarrollo externo. Por ejemplo, la laguna-torca de Orduña, se produjo en el año 1912 y según los testimonios escritos evolucionó del modo siguiente: el día 2 de febrero de 1912, precedido de estampidos como si se tratara de truenos, apareció en un trigal un hueco de unos 20 cm de diámetro, que continuaba en profundidad. Al día siguiente tenía varios metros de diámetro y a los dos meses 14 m. Su extensión actual se alcanzó en mayor tiempo y es de 60 m de diámetro y 13,5 m de calado, hueco que fue ocupado por las aguas y motivó la laguna que puede observarse en esta región. El proceso, esta vez controlado y en nuestro siglo, se produjo por disolución lenta de terrenos salinos, hasta que la cavidad alcanzó la superficie y el terreno consiguió una posición de equilibrio.

Estos fenómenos son muy frecuentes en ciertas zonas españolas. En Zaragoza se observan en los glaciares que recubren la margen derecha del Ebro y afectaron no hace mucho a unos edificios de viviendas. En su estadio final puede verse en las denominadas simas de Barragán, al SO. de Casetas. Forman depresiones circulares de unos 100 m de diámetro o superior, contorneadas por grietas y con suave depresión hacia su interior. Dentro del área que definen se encuentran hundimientos de media docena de metros de diámetro y análoga dimensión en profundidad. El proceso se explica porque las aguas de riego infiltradas, o las procedentes de fugas de conducciones, atraviesan las graveras hasta alcanzar el terreno yesoso terciario. En éste se concentran en las vaguadas de la topografía previa a la deposición de los aluviones y en su caminar no sólo disuelven el yeso, sino que deshacen ligazones aciculares que establece este material entre los limos y partículas arcillosas y arrastran materiales arcillosos. Los aluviones poco a poco van quedando sin apoyo y caen al fondo de la cavidad formada, donde son lavados los elementos finos. La cavidad progresa en dimensiones y hacia la superficie. En ésta existe un encalichado, que arma una bóveda plana y que bruscamente se hunde, determinando la torca de dimensiones reducidas. No obstante, se comprende que un descenso del terreno de unos 5 m en una superficie de unos 6 m de diámetro puede presentar un serio problema para la estabilidad de un bloque de viviendas, como sucedió en el año 1970.

Los asientos suaves en los bordes de la depresión originan sin duda fisuraciones que favorecerán el ataque posterior de las aguas seleníticas.

Señales de estos fenómenos las hemos igualmente observado al NO. de Albacete, donde, en la llanura pliocena, también se observan zonas ovaladas suavemente deprimidas que

ocupan una banda, indicativa de la circulación de las aguas infiltradas. También en esta zona existe un encalichado, en este caso claramente calcáreo, que motiva una bóveda, que al hundirse origina estas zonas deprimidas, con diámetros del orden de los 100 m.

Formación rápida de huecos en terrenos yesíferos, la hemos encontrado igualmente en el Keuper de la zona de Guadalhorce, en los terrenos que debe atravesar el túnel de desviación del ferrocarril, variante obligada por el embalse del mismo nombre.

En muestras de arcillas yesosas se ha podido observar al microscopio que las partículas de arcilla están enlazadas por delgadas agujas de yeso. Si esta distribución fuese general en los materiales limosos con yeso, es fácil explicarse los fenómenos de colapso en probetas de este material, que sometidas a carga y posteriormente inundadas, sufren un importante asiento. Este fenómeno, ya a escala natural, puede originarse en este terreno por las fluctuaciones del nivel freático, o por fugas de agua de las conducciones en las estructuras o en sus proximidades. Los huecos no son más que el resultado de la disolución del yeso o sal, que en su proceso de formación llega a dejar aislados, sin puntos de contacto entre sí, los elementos de los acarreos recientes de las zonas áridas.

V. Efectos en los distintos tipos de obras subterráneas

Con esta presentación de los procesos de ataque podemos pasar al análisis de los diferentes tipos de obras subterráneas.

V.1. Túneles y galerías subterráneas

Es necesario distinguir en primer lugar los túneles que conducen agua con presión superior a la piezométrica de la zona que atraviesan. En este caso el agua no penetrará en el túnel, sino que saldrá de él por los fallos que existan en la continuidad del revestimiento de la conducción. Si el terreno es agresivo por la calidad del agua que contiene, ésta será barrida o en cualquier caso no se moverá hacia el revestimiento. El ataque, por tanto, será pequeño y sólo puede acelerarse en los momentos de vaciado de la conducción.

En el caso contrario, sobre todo si el túnel no conduce un fluido o lo hace en régimen libre, las condiciones son muy diferentes. El agua agresiva del exterior penetrará en el túnel, atravesando el hormigón del revestimiento y si la filtración es concentrada, ataca el intradós y la solera con un goteo o chorro, condiciones claramente favorables para el ataque. Esto se ha podido comprobar en múltiples casos de túneles en la zona del Ebro.

La penetración del agua agresiva a presión a través de un revestimiento de hormigón, en principio parece ser la causa de destrucciones, pero la realidad muestra que a este efecto se unen otros ligados a la mala ejecución del hormigón o falta de precauciones elementales, con los que se pueden explicar las aparatosas destrucciones observadas.

En un túnel de ferrocarril en el Norte de España las impresionantes destrucciones del revestimiento no estaban ligadas directamente a las condiciones externas del terreno. En el túnel no se habían colmatado los huecos entre el revestimiento y el terreno, que eran muy importantes. El revestimiento se había realizado con árido proveniente del machaqueo de areniscas pérmicas, extraídas en la perforación y que poseían en abundancia

vetas de yeso de segunda formación. El machaqueo indiscriminado motivó un árido altamente contaminado, de forma, que en las zonas destruidas, pudieron localizarse cristales de yeso. El yeso dentro del hormigón explicaba su destrucción rápida, y aclaraba el que se pudiera introducir un bastón con la presión del cuerpo, hasta atravesar en su totalidad el hormigón.

En los túneles del Taibilla se comprobó que en zonas yesosas se habían destruido algunos anillos, que analizados, mostraron unos un incipiente ataque químico en el trasdós y otros sólo un efecto mecánico. El fenómeno de rotura mecánica es lógico en los terrenos yesosos, pues las margas suelen originar empujes que es preciso evaluar y resistir, y que de no adecuarse la estructura, causan al menos unas fisuraciones que suponen un camino abierto para el posterior ataque químico.

Tampoco se puede olvidar la presencia de anhidrita, que en su transformación en yeso motiva empujes importantes, y que en los terrenos yesosos es más abundante de lo que en un principio se piensa.

La defensa del ataque químico no debe basarse en el uso indiscriminado de cementos especiales. Lo primero a conseguir es un hormigón compacto e impermeable, exento de contaminación a través del árido o de la propia agua de amasado, después construir correctamente, no dejando huecos entre el revestimiento y el terreno y recurriendo a las inyecciones si no se dispusiera de otro método que garantizase la unión. Sólo con esto se han solucionado túneles de estado muy deficiente por el ataque de las aguas selenitosas. En último lugar es cuando debe considerarse la conveniencia o no de usar cementos especiales, pero tras el análisis de las aguas y cuantificación de su composición química y no limitarse únicamente al contenido de yeso o, de SO_4^- .

V.2. Inyecciones

Las inyecciones de lechada de cemento para corregir el terreno o rellenar huecos son ampliamente utilizadas. Con frecuencia se les añade arcilla que aumenta su penetración y, una vez más, podíamos citar casos en los que la arcilla estaba contaminada con las sales cuyos efectos querían paliarse.

Conocemos casos un poco extraños en los que el fraguado de la inyección ha sufrido retrasos considerables. Por ejemplo, durante las pruebas de inyección en los acarreos del Río Segura en Ojós, encontramos que no conseguíamos el fraguado de la lechada inyectada. En la mezcla se había utilizado agua del propio río con un contenido en cloruros y sulfatos no excesivo para justificar este fenómeno. El problema se resolvió utilizando agua que hubo de transportarse desde unos 10 km. En la presa de El Vado, en el Río Jarama, recientemente se ha encontrado lechada de mortero inyectado hace varios años y que no había fraguado. En este caso se trata de un ambiente de aguas bastante puras y algo ácidas.

En resumen, en el caso de las inyecciones de cemento en terrenos agresivos, deben tomarse precauciones, puesto que aun siendo poco frecuentes, también se encuentran fenómenos anómalos.

V.3. Cimentaciones mediante zapatas

Con frecuencia se toman precauciones indiscriminadas y en nuestra opinión, excesivas, como utilizar cementos sulforresistentes y además protegerlos del contacto con el terreno mediante una capa de ladrillos, arcilla, etc.

Es difícil concebir que en un macizo de las dimensiones de una zapata pueda ser destruido en su totalidad por el ataque de las aguas agresivas, ya que la circulación de las aguas subterráneas es lenta, los terrenos margoyesosos son normalmente impermeables y los gradientes en este caso de cimentación son muy bajos. Creemos que en la mayor parte de los fenómenos registrados las causas hay que buscarlas en defectos de construcción: árido inadecuado, agua contaminada y por último la posibilidad de una contaminación en la propia obra durante las operaciones de acopio y mezcla de los áridos.

A efectos de construcción y proyecto deben estudiarse no sólo la composición del terreno y características del agua subterránea, sino también la situación del nivel piezométrico antes y después de la construcción, e igualmente la distribución de los desagües y riegos en las zonas próximas a las zapatas.

V.4. Cimentaciones mediante placas o losas

La diferencia respecto a las anteriores arranca del muy diferente espesor de este elemento constructivo, así como la existencia de armaduras. Salvo en el caso de que la placa actúe como un elemento de cierre, situado bajo el nivel freático, que motivaría un gradiente favorable a la infiltración de las aguas a través del hormigón, no es de temer ataques peligrosos.

Los ataques físicos, en oposición al caso de las zapatas, pueden llegar a ser muy importantes, debido a las corrientes parásitas, que precisan un terreno conductor, característica común de los suelos yesosos o salitrosos.

Tanto en este caso como en las zapatas, constituye un problema diferente cuando en su entorno existe una corriente de agua agresiva, como pudiera ser una zapata en un río, que estuviera por encima del fondo del cauce. En este caso ya no sería obra subterránea.

V.5. Cimentación mediante pilotes

Los pilotes hincados o prefabricados aportan normalmente la garantía de su buena ejecución y salvo un ataque limitado a través de la fisura que pudiera producirse durante su hinca, no es lógico prever destrucciones importantes.

En los pilotes moldeados in situ los peligros son muy superiores, ya que es difícil garantizar que no se produzca una disgregación del hormigón o que éste se mezcle con agua agresiva antes de su fraguado, lo que favorece el ataque químico. Tampoco puede olvidarse el efecto de las corrientes parásitas con corrosión de las armaduras. Personalmente no conozco casos de ataque en este tipo de cimentación, pero quizá si se investigara la situación real de los pilotes en terrenos agresivos se encontrarían importantes destrucciones.

En los tipos de construcción considerados no se han tenido en cuenta los fenómenos mecánicos, ya que la única defensa contra ellos es una detallada investigación del terreno, contemplando simultáneamente el efecto de la construcción que modifica el ambiente subterráneo, bien por bajada del nivel piezométrico de la zona al prescindir de unos riegos y disponer una superficie impermeable en el área edificada, o, por el contrario, una subida del nivel piezométrico por las fugas de las conducciones de aguas.

V.6. Conducciones enterradas

Las tuberías de hormigón que se utilizan en estos casos poseen normalmente una gran calidad, propia de la prefabricación. El agua en el terreno no entrará en la conducción, a favor de las fisuras o juntas del hormigón, pero sí puede circular semisuperficialmente entre el contacto terreno-tubería, lo que ligado al reducido espesor de hormigón hace posible un ataque destructivo.

Sin embargo en estos casos es más frecuente el ataque físico por las corrientes parásitas, lo que obliga a tomar precauciones cuando la resistividad del terreno es baja, precauciones que pueden concluir en una protección catódica.

VI. RESUMEN

En los terrenos agresivos debe analizarse la composición del agua de forma completa, tener en cuenta que el ataque químico es muy complejo y no es conocido en su totalidad, que antes de recurrir a los cementos especiales debe conseguirse una buena ejecución del hormigón y evitar al máximo que la contaminación alcance al árido o al agua.

Los cementos resistentes a los sulfatos deben elegirse con cuidado, ya que pueden resultar incluso menos eficaces que los hormigones normales correctamente empleados.